

DYNAMIQUE FLUVIALE, CHANGEMENT GLOBAL ET PRESSION ANTHROPIQUE DANS LE BASSIN, LE COURS ET LE DELTA DE L'ÈBRE

Alfredo OLLERO ¹, Askoa IBISATE ², Vanesa ACÍN ³, Daniel BALLARÍN ^{1,4}, David GRANADO ³,
Jesús HORACIO ⁵, Daniel MORA ⁴, Estela NADAL ¹, Miguel SÁNCHEZ FABRE ¹,
María SEBASTIÁN ¹, Francesca SEGURA-BELTRAN ⁶, Ana VALLS ⁶

RÉSUMÉ – Le fonctionnement des rivières du bassin de l'Èbre a subi d'importants changements depuis 1950. Il s'agit d'un processus rapide et très marqué, de simplification et de stabilisation sur le fleuve principal et sur ses principaux affluents pyrénéens. Ce processus s'est manifesté par des changements dans la morphologie fluviale, le développement de la végétation sur les lits, un rétrécissement de l'espace naturel fluvial et une incision des lits fluviaux. Les facteurs de ce processus sont le changement global dans le bassin, la construction de réservoirs d'eau et d'autres nombreuses pressions humaines directes, notamment d'extractions de graviers et de canalisations. Le delta de l'Èbre, actuellement dans une situation de recul, réagit lui aussi à ces facteurs et à ce processus.

ABSTRACT – RIVER DYNAMICS, GLOBAL CHANGE AND HUMAN PRESSURE IN EBRO BASIN, CHANNEL AND DELTA. The river Ebro and its tributaries has undergone very remarkable changes since 1950. They have suffered marked process of simplification and stabilization, both in the main river and in its main Pyrenean and Iberian tributaries. They show important changes in the channel morphology, vegetation encroachment, narrowing of the fluvial natural space and incision. The causes of these adjustments are the global change that has affected the basin, accompanied by the construction of reservoirs and other numerous direct human pressures, especially gravel extractions and channelization. The Ebro Delta, currently regressive, also responds to the same factors and processes.

RESUMEN – DINÁMICA FLUVIAL, CAMBIO GLOBAL Y PRESIÓN ANTRÓPICA EN LA CUENCA, CAUCE Y DELTA DEL EBRO. El funcionamiento de los ríos de la cuenca del Ebro ha asistido a cambios muy notables desde 1950. Se trata de un proceso rápido y muy marcado de simplificación y estabilización, tanto en el río principal como en sus principales afluentes pirenaicos y en algunos ibéricos, manifestado en cambios en la morfología del cauce, incremento de la vegetación en el mismo, estrechamiento del espacio natural fluvial e incisión. Los factores de estos cambios se encuentran en el cambio global al que ha asistido la cuenca, acompañado por la construcción de embalses y otras numerosas presiones humanas directas, en especial extracciones de gravas y encauzamientos. El Delta del Ebro, en situación actual regresiva, también responde a los mismos factores y procesos.

GÉOMORPHOLOGIE FLUVIALE – CHANGEMENT ENVIRONNEMENTAL – STYLES FLUVIAUX – IMPACT ENVIRONNEMENTAL

FLUVIAL GEOMORPHOLOGY – ENVIRONMENTAL CHANGE – CHANNEL PATTERNS – ENVIRONMENTAL IMPACT

GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL – CAMBIO AMBIENTAL – ESTILOS FLUVIALES – IMPACTO AMBIENTAL

¹ Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, aollero@unizar.es, danielbf@unizar.es, estelanr@unizar.es, msanchez@unizar.es, msebas@unizar.es

² Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Universidad del País Vasco UPV/EHU, askoa.ibisate@ehu.es

³ Ecología y Territorio ECOTER S.C., vanesa.ecoter@gmail.com, davidgranadog@gmail.com

⁴ Medio Ambiente, Territorio y Geografía MASTERGEO S.L., danielbf@unizar.es, dmoramur@gmail.com

⁵ Departamento de Geografía, Universidad de Santiago de Compostela, hhorahh@gmail.com

⁶ Departamento de Geografía, Universidad de Valencia, francisca.segura@uv.es, avalls5@alumni.uv.es

Une des lignes de travail fondamentale de la géomorphologie fluviale identifie, quantifie et analyse la dynamique, les changements et les ajustements des lits fluviaux et des plaines alluviales, tout en essayant d'interpréter et d'évaluer leurs origines (Zawiejska et Wyzga, 2010 ; Buffington, 2012 ; Scorpio et Roskopf, 2016). Identifier dans quelle mesure les changements analysés dans un tronçon fluvial particulier répondent à la dynamique naturelle (Ibáñez *et al.*, 2011), à des impacts locaux, au changement global ou à la synergie entre tous ces facteurs constitue un labeur complexe (Ollero *et al.*, 2015). Ce défi, de grand intérêt scientifique et utile à la gestion et à la restauration, requiert l'étude d'innombrables variables durant un temps prolongé (Ollero, 2011 ; Horacio, 2015).

Les changements morphologiques dans l'Anthropocène récente ont beaucoup été étudiés dans la littérature, et l'on a prêté une attention toute particulière à la perte de modèles en tresses dans les aires de montagne (Piégay *et al.*, 2009). Comme dans tous les pays développés, dans le district hydrographique de l'Èbre les lits fluviaux se trouvent très endommagés, aussi bien par les pressions du bassin versant que par des impacts locaux.

Dans cet article, nous exposerons les principaux changements qui ont eu lieu récemment, à travers les changements naturels mais aussi ceux induits, enregistrés dans le réseau fluvial du bassin-versant de l'Èbre, dans son cours principal et dans le delta. On expliquera leurs causes et l'on fera un diagnostic de la problématique actuelle.

I – Données et méthodes

Le bassin-versant de l'Èbre occupe une bonne partie du quadrant nord-est de la péninsule Ibérique avec une superficie de 84 393 km². Il présente une grande diversité de territoires ; des hautes cimes pyrénéennes aux aires semi-désertiques du centre de la dépression de l'Èbre. Le réseau fluvial possède lui aussi une grande géodiversité, qui va des torrents de montagne et des cours d'eau en tresses du pied de versant aux grands chenaux méandriformes situés dans d'amples plaines d'inondation de l'Èbre et de ses principaux affluents. Mais il existe aussi un important réseau de cours d'eau temporaires. Le delta de l'Èbre, qui s'étend sur 320 km² de superficie, est l'un des plus importants de la Méditerranée. Toutes ces caractéristiques font du bassin versant de l'Èbre une

excellente zone pilote pour réaliser des études intégrales sur la dynamique globale des fleuves et des rivières en Méditerranée.

Nous présenterons un travail de compilation des résultats obtenus jusqu'à maintenant par divers groupes d'investigation, qui ont participé à de nombreux projets. Il s'agit donc, d'un travail sur l'état de la question, qui soulève de nombreuses questions et ouvre une porte à la réflexion. Nous avons travaillé à partir de la documentation pré-existante et de la consultation d'études scientifiques et techniques antécédentes. Ces études s'appuient principalement sur l'analyse statistique et évolutive de données climatiques et hydrologiques et sur l'interprétation diachronique des systèmes fluviaux à partir de cartes anciennes et de photos aériennes. Pour certains secteurs – Èbre moyen et cours en aval de ses principaux affluents pyrénéens – nous nous sommes appuyés sur les cartes historiques et les photographies d'un vol réalisé en 1927 par la Confédération hydrographique de l'Èbre.

Les auteurs de cet article ont participé à différents projets et contrats d'investigation sur ce thème. Ils possèdent donc une solide expérience de travail sur le terrain dans ce domaine d'étude. Les projets antécédents les plus remarquables sont les suivants : « *Estudio hidrológico, jurídico, ecológico y económico de los recursos hídricos de la cuenca del Cinca para el diseño de un modelo de gestión sostenible* » (1996-2000), « *Plan gestor del LIC y ZEC tramos bajos del Aragón y el Arga* » (2001), « *Delimitación y caracterización de áreas inundables por procesos de alta y media frecuencia en los cursos fluviales del Irati y el Aragón como base para la gestión de caudales* » (2001-2002), « *Determinación del estado ecológico de los ríos de Aragón, tramificación e indicadores hidromorfológicos* » (2002-2003), « *Bases para la gestión ambiental y la reducción de riesgos en el tramo aragonés del Ebro* » (2003), « *Tramificación de la red fluvial de la cuenca del Ebro* » (2004-2005), « *Estudio hidrológico, geomorfológico, hidráulico y ecológico del bajo Gállego en el término municipal de Zaragoza para su gestión como espacio fluvial* » (2003-2005), « *Plan Medioambiental del Ebro y tramo bajo del Cinca* » (2004-2005), « *Evaluación del riesgo de inundación en Fraga por crecidas del Cinca. Propuesta de soluciones* » (2005), « *Caracterización y valoración hidromorfológica y ecológica de los ríos y riberas de las cuencas altas del Aragón y el Gállego, para el diseño de un plan ambiental* » (2005-2006), « *Funcionamiento y evolución del sistema fluvial, valoración ecológica y criterios de actuación en el río Aragón entre Jaca y el embalse de*

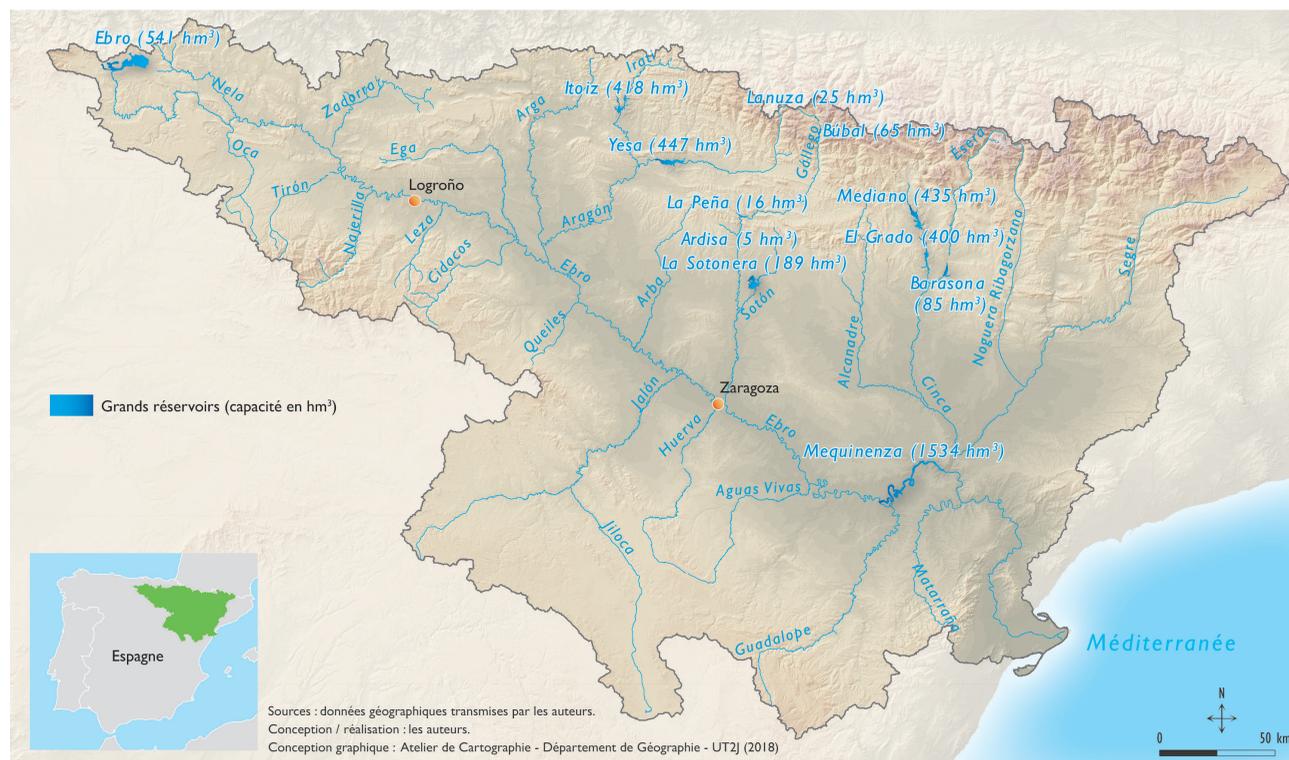


Fig. 1 – Aire d'étude. Base : système d'information territoriale de l'Èbre

Yesa » (2006), « Estrategia Nacional de Restauración de Ríos » (2006-2007), « Procesos y balances hidrológicos y de sedimento a diferentes escalas espaciales en ambientes mediterráneos: efectos de las fluctuaciones climáticas y los cambios de uso del suelo » (2006-2010), « Evaluación de procesos de dinámica fluvial para la restauración del río Aragón en Caparrosa » (2008), « Efectos de las minicentrales hidroeléctricas en los sistemas fluviales de Navarra: diagnóstico, tendencias y propuestas de gestión » (2007-2009), « Mejorando la aplicación de los resultados de la investigación y de las experiencias de casos a las respuestas ecológicas de la degradación y rehabilitación hidromorfológicas » (2008-2010), « Caracterización y valoración geomorfológica de los ríos de la comarca de Sobrarbe » (2009), « Estudio de alternativas de actuación de restauración de ríos y defensa frente a inundaciones en la zona de confluencia de los ríos Arga y Aragón » (2009-2010), « Protocolo de caracterización hidromorfológica de masas de agua de la categoría ríos » (2013-2015), « Cambios ambientales y antrópicos en cuencas fluviales mediterráneas: impactos históricos en la morfología, los flujos sedimentarios y la vegetación » (2013-2016), « Elaboración de la herramienta científica RiMR (River-Management-Restoration)

para la gestión ambiental sostenible de cuencas fluviales » (2016-2017).

II – Changement global et dynamique fluviale dans le bassin de l'Èbre

Le fonctionnement hydrogéomorphologique des fleuves et rivières du bassin de l'Èbre a connu des changements notables tout au long de l'histoire, et particulièrement depuis 1950. Les changements des dernières décennies ont constitué la réponse géomorphologique à une importante réduction des débits, des crues et des apports sédimentaires. Les causes de ce phénomène se trouvent dans le changement global, qui inclut une évolution des températures et des précipitations mais aussi des changements importants d'utilisation du sol et des couvertures végétales dans le bassin, auxquels s'ajoute l'effet des nombreux barrages-réservoirs. L'on peut donc affirmer sans crainte, que la dynamique fluviale des lits fluviaux répond à la transformation globale du bassin versant (Ollero *et al.*, 2015). La situation présente de nombreuses similitudes avec d'autres aires péenninsulaires

(Conesa, 1999 ; Segura-Beltran et Sanchis-Ibor, 2013 ; Sanchis-Ibor et Segura-Beltran, 2014) et d'autres régions de la planète (Blösch *et al.*, 2007 ; Hoffmann *et al.*, 2010). La réduction des débits de tous les fleuves depuis 1950 (Beguería *et al.*, 2003) s'est intensifiée à partir de 1980 (López Moreno *et al.*, 2011) non seulement à cause de la diminution des précipitations (Del Río *et al.*, 2011) mais aussi et surtout en raison de l'augmentation de l'évapotranspiration provoquée par des températures plus élevées (Lorenzo *et al.*, 2010). Des tendances similaires ont été observées dans le Sud-Ouest français (Lespinas *et al.*, 2011, 2015). Il faut ajouter à cela une réduction de la fréquence et de l'intensité des crues ordinaires qui correspond à l'augmentation de la couverture forestière dans les aires de montagne (García Ruiz *et al.*, 2011 et 2015). Le bassin de l'Èbre est celui qui compte le plus de réservoirs au monde par rapport aux ressources disponibles (Zarfl *et al.*, 2015). Cette abondance de petits et grands réservoirs et les importantes consommations d'eau destinée à l'irrigation ont provoqué des changements notables de la saisonnalité des régimes fluviaux et ont altéré la fréquence des crues (Frutos *et al.*, 2004 ; Sánchez Fabre et Ollero, 2010). La figure 2 fait la synthèse de cette évolution hydrologique sur les principaux fleuves du bassin (Ollero *et al.*, 2015).

Ibisate, 2013 ; López Moreno *et al.*, 2006, 2008 et 2011 ; Batalla *et al.*, 2014), de même que leurs répercussions dans le transport de sédiments (Batalla, 2003 ; Day *et al.*, 2006 ; Liquete *et al.*, 2009 ; Batalla et Vericat, 2011). Les conséquences géomorphologiques de ces derniers ont été moins étudiées, en particulier les changements dans la morphologie des lits, et on a souvent simplifié le problème. Cependant, il nous faut mentionner certains travaux de Beguería *et al.* (2006) ou de García-Ruiz *et al.* (2010) où l'on constate le processus de changement des lits fluviaux liés aux facteurs principaux, quoiqu'ils n'apportent aucune cartographie, ni aucune donnée superficielle issue de la photo-interprétation. Néanmoins, les mesures faites des variations superficielles des lits et des plaines inondables ont été réalisées dans certaines études telles que celles de Acín (2004), Granado (2004), Acín *et al.*, (2011) ou de Llena *et al.*, (2016), et plus récemment, on a évalué des typologies et des ajustements dans certains travaux de synthèse (Besné et Ibisate, 2015 ; Lobera *et al.*, 2015).

Il faut souligner la grande diversité des cours d'eau présents dans le bassin, diversité mise en exergue dans des travaux de classifications et de tronçonnement (Ollero *et al.*, 2004), ainsi que plusieurs singularités comme certains

Le monitoring de quatre bassins expérimentaux dans les Pyrénées, gérés par l'institut pyrénéen d'Écologie (IPE-CSIC), a servi à démontrer l'importance hydrologique jouée par la couverture végétale. Le fonctionnement hydrologique de ces bassins, selon les utilisations faites du sol, a démontré que l'abandon des terres de culture favorise une rapide extension de la colonisation végétale et une diminution des aires d'écoulements et de sédimentation (García Ruiz *et al.*, 2015).

Dans une perspective hydro-morphologique, les effets hydrologiques des réservoirs et du changement global dans le bassin de l'Èbre ont été attentivement analysés dans les cours d'eau pyrénéens (Beguería *et al.*, 2003 ; Batalla *et al.*, 2004 ;

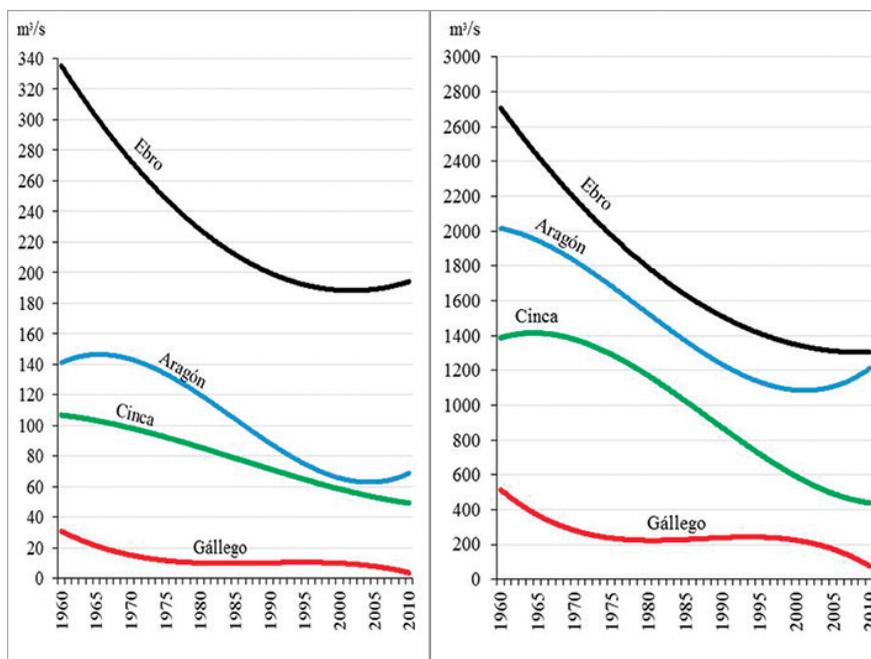


Fig. 2 – Lignes de tendance de 1960 à 2010 dans les débits moyens (gauche) et maxima annuels

Source : données de jaugeage (Èbre à Saragosse, Aragón à Caparros, Cinca à Fraga, Gállego à Saragosse)

Tableau 1 – Généralisation d’ajustements et d’impacts-type dans les six styles fluviaux principaux du bassin

Type de cours	Ajustements	Impacts locaux	Exemples
Torrents et cours supérieurs	Colonisation végétale	Barrages de rétention de sédiments	Arás, Remáscaro
Cours en tresses	Rétrécissement, simplification	Extractions	Ara, Cinca, Aragón
Cours encaissés rocheux	Fonctionnement naturel	Dérivations de débit, débordements	Alcanadre, Vero, Isuala
Sinueux	Rétrécissement, incision, colonisation végétale	Canalisations, occupation, dérivations de débit	Jalón, Huerva
Méandriques	Rétrécissement, stabilisation	Canalisations, occupation, dérivations de débit, extractions	Ebro, Aragón
Temporaires	Rétrécissement, incision	Barrages de rétention, canalisations, occupation, gués, extractions	Seco, Valcodo

Source : Ollero *et al.*

cours anastomosés dans des aires de remplissage glaciaire (Aguastuertas, Aigualluts, Neila, Arcalis). De cette façon il est possible de définir à grands traits six grands types de cours fluviaux:

- i) torrents (gaves) et cours supérieurs ;
- ii) tronçons en tresses ;
- iii) secteurs encaissés dans des roches cohérentes ;
- iv) cours sinueux de faible développement latéral ;
- v) rivières méandriques libres ;
- vi) cours d'eau temporaires tels que les barrancos et les ramblas.

La plupart de ceux-ci ont souffert des processus d'ajustement récents dus au changement global et à la régulation des débits. De plus, ils ont aussi subi des impacts locaux parfois très importants (tableau 1).

Les ajustements les plus courants dans le réseau fluvial du bassin versant, conséquences du changement global, peuvent se résumer en cinq processus associés qui s'alimentent entre eux :

- i) simplification (et réduction de bras et de morphologies) ;
- ii) stabilisation du lit (qui perd sa dynamique latérale) ;
- iii) colonisation végétale à l'intérieur du lit ;
- iv) rétrécissement du lit ;
- v) incision ou encaissement dans le fond des lits fluviaux.

On peut observer certains d'entre eux, ou tous, dans les cours d'eau du bassin-versant avec plus ou moins d'intensité. La comparaison de photographies anciennes (1927 pour certaines vallées, 1946 ou 1956 pour d'autres) avec les images actuelles met en évidence ces transformations. On peut trouver certains cas recueillis dans la figure 3.

Depuis la seconde moitié du ^{xx}e siècle, on assiste à une simplification de la dynamique fluviale dans le bassin versant de l'Èbre. L'exode rural, la régulation au moyen de réservoirs et l'augmentation de la consommation d'eau (notamment pour les cultures irriguées) ont accéléré ce processus de changement global. À ce jour, ces processus ne semblent pas s'atténuer.

Dans les cours supérieurs et les tronçons encaissés rocheux on trouve peu de modifications. Néanmoins, sur les cônes de

déjection des torrents, les secteurs les plus actifs se sont rétractés avec une réduction de superficie de la bande active (Gómez Villar, García Ruiz, 2000). C'est dans les cours d'eau plus larges du piémont qu'ont lieu les changements morphologiques les plus rapides et significatifs (Beguiría *et al.*, 2006 ; Gómez Villar *et al.*, 2014). Les lits en tresses, de style divagant, et les fonds de gravier en général souffrent d'un processus de rétrécissement, de simplification, de stabilisation et de colonisations végétales évidentes. Ils se voient substitués par des styles sinueux simples (Ollero *et al.*, 2016). Dans les cours d'eau plus simples et plus sinueux, comme les ibériques Jalón et Huerva, la colonisation végétale du lit mineur est complète et les barres sédimentaires mobilisables ont disparu au long des 15 dernières années.

III – Changements récents dans le cours moyen de l'Èbre

Le cours moyen de l'Èbre, entre Logroño et La Zaida, est constitué d'un cours libre de 350 km sur une plaine inondable de 3,2 km de largeur moyenne. Ce lit a été extraordinairement dynamique au cours de l'histoire et il constitue un indicateur parfait des changements environnementaux du bassin-versant. Jusqu'en 1900, il présente un style essentiellement méandrique qu'il est possible de décrire à travers les traces encore visibles dans les plaines d'inondation : courbes, migrations et coupures de méandres (Ollero, 1992). L'abondance de sédiments déposés entre 1880 et 1940 à cause de la pression démographique (terrasses, réduction des

masses forestières) dans les aires de montagne du bassin, a obligé à un ajustement de l'Èbre moyen à un modèle divagant avec nombre de barres et d'îles fluviales. Cependant, entre 1950 et 1980 le fleuve a récupéré son tracé méandrique et l'a consolidé grâce à la récupération de la couverture végétale dans le bassin-versant et

la régulation croissante des eaux, en particulier celle des barrages-réservoirs en amont de l'Èbre (depuis 1945) et de Yesa dans le fleuve Aragón (depuis 1960).

Dans les photographies aériennes de 1927 et 1957 on a pu constater 81 changements naturels (augmentations de la sinuosité, migration de méandres, élargissement des lobes, coupures et même quelques avulsions) tout au long du tracé du lit dans ce tronçon de l'Èbre, avec une superficie mobilisée de près de 2 000 ha. Entre 1957 et 1980 la dynamique s'est réduite à 39 changements et moins de 400 ha mobilisées (Ollero, 2010). Après 1980, aucun changement important du tracé n'a été enregistré, à part quelques modifications minimales des bancs d'alluvions de barres graveleuses de moins en moins mobilisables par les crues du fait de l'augmentation de la végétation. L'indice de sinuosité moyen s'est maintenu à 1,51 depuis lors.

Le fonctionnement global du bassin a provoqué la même réponse dans l'évolution de l'Èbre que dans celle de ses affluents. Nous mettrons en exergue certains patrons tels que : une simplification progressive du cours (Ollero, 2010 ; Cabezas *et al.*, 2009), une colonisation végétale croissante et une accélération des processus de succession de la ripisylve (Magdaleno, Fernández Yuste, 2011 ; Magdaleno *et al.*, 2012). Nous signalerons aussi l'incision significative (jusqu'à 2 m) dans certains tronçons ponctuels du cours de l'Èbre moyen, mais qui n'est pas généralisée, puisque certains tronçons connaissent un léger

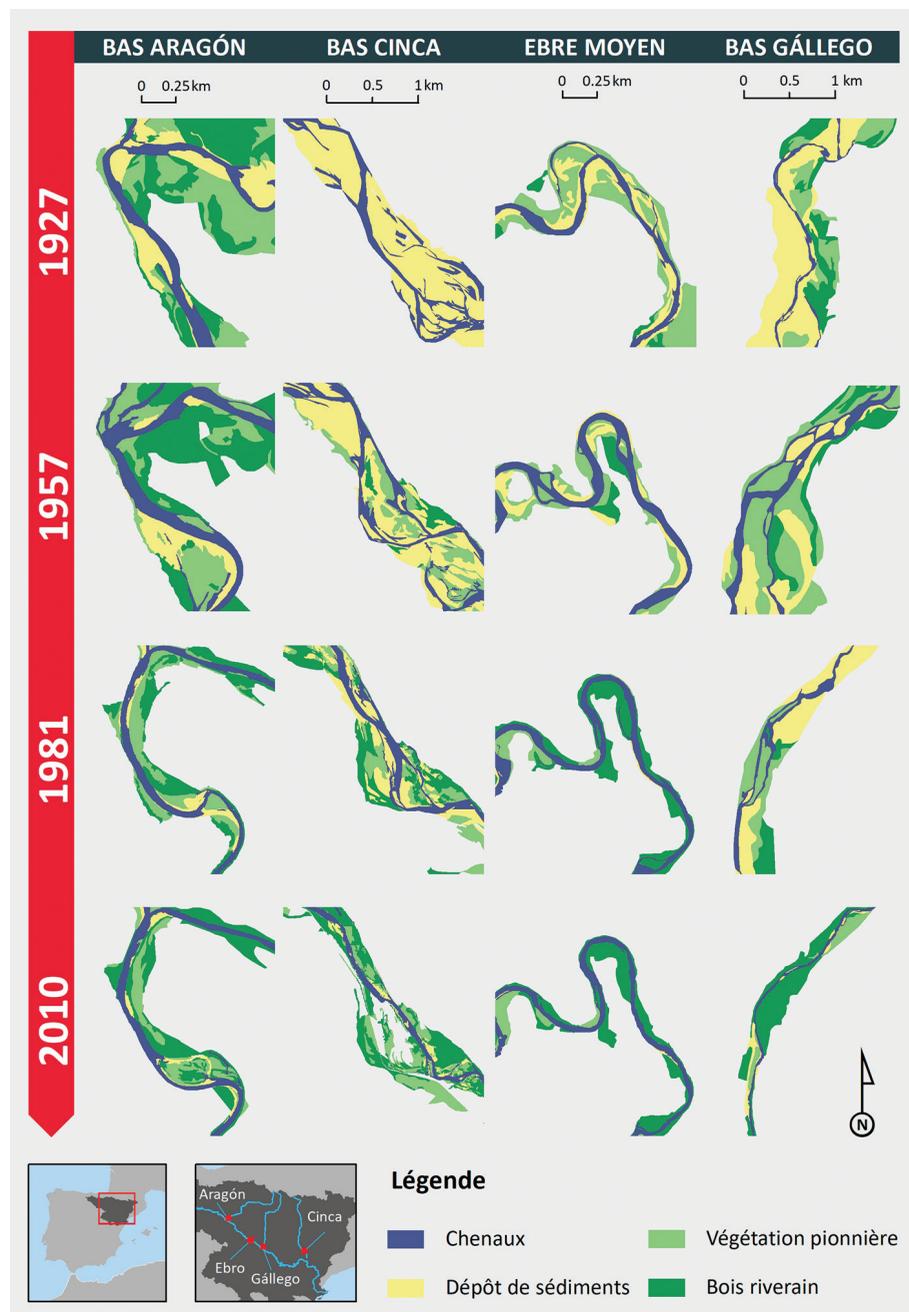


Fig. 3 – Exemples de dynamique fluviale en processus de simplification. Élaboration propre à partir de projets de recherche antérieurs

Source : Ollero *et al.*, 2015.

exhaussement (jusque 0,5 m) par rapport aux obstacles et à la perte de pente (Ollero *et al.*, 2015).

Entre tous les facteurs qui ont causés ces impacts, les travaux de défense terminés entre 1980 et 1985 ont fini par éliminer toute possibilité de changement du tracé, de telle sorte que l'Èbre moyen actuel est un fleuve méandrique stabilisé et limité par les ouvrages de défense (Ollero, 2010). Nous avons aussi constaté des changements dans l'utilisation des sols dans la plaine alluviale, avec une augmentation de l'urbanisation et des installations d'équipements destinés à l'élevage, ce qui accroît la vulnérabilité face aux inondations. Les crues, en particulier celles de février 2003 et de mars 2015, maintiennent leur fréquence, quoiqu'elles aient diminué en débit solide et en magnitude, du fait du laminage créé par les multiples barrages du bassin versant.

IV – Évolution et problématique du delta de l'Èbre

Le delta de l'Èbre possède une superficie émergée de 320 km² et un volume sédimentaire supérieur à 28 km³ (Guillén et Palanques, 1992). On considère qu'il s'agit d'un delta micromaréal dominé par les processus fluviaux et les houles. On attribue sa forme actuelle à une décélération de l'augmentation du niveau de la mer qui aurait eu lieu ces 8 000 dernières années (Somoza et Rodríguez-Santalla, 2014). De chaque côté de la plaine deltaïque se forme une flèche à pointe libre, Banya (ou Alfacs) [S], uni au delta par les flèches du Trabucador (S) et le Fangar (N). Deux îles se sont formées dans le lit : celle de Gràcia, à environ 15 km de la côte, et celle de Buda qui sépare les deux tributaires de l'embouchure (fig. 4).

On a étudié l'évolution du delta à différentes échelles temporelles, à partir de la sédimentologie et de la stratigraphie (Maldonado, 1972 ; Maldonado, Riba, 1971 ; Somoza, Rodríguez-Santalla, 2014), de la cartographie historique (Canicio, Ibañez, 1999 ; Valls *et al.*, 2016) et de la photographie aérienne (Guillén, Díaz, 1990 ; Guillén, Palanques, 1997). Tout au long de l'histoire, le delta a subi une progradation due aux changements environnementaux et anthropiques, qui ont eu lieu ces 2 000 dernières années. À l'époque des Romains, l'embouchure se trouvait près de Tortosa, alors qu'au XI^e siècle la côte s'avancé jusqu'à Amposta. Entre 1149 et 1362 apr. J.-C. le lobe du Riet Vell s'est formé alors

qu'entre 1350 et 1700 apr. J.-C. l'embouchure s'est déplacée vers le nord, dans le Riet Fondo. Durant les XIV^e et XV^e siècles, un nouveau lobe s'est formé au nord-ouest (le Goleró) et depuis 1700 c'est celui de Migjorn qui est actif. C'est à partir de ce moment que se développe le lobe de Buda, formé par le lit actuel (Somoza, Rodríguez-Santalla, 2014).

La cartographie historique de la fin du XIX^e siècle présente un delta très différent à celui d'aujourd'hui, où l'on distingue les paléolits fluviaux, certains encore actifs, associés aux lobes historiques. Le delta de la carte de Francisco Coello, de 1858 (fig. 4a), a une superficie approximative de 307,21 km², si l'on compte les flèches de Fangar et la Banya, dont l'aire est d'environ 1,65 km² et 24,20 km² respectivement. Dans la carte on peut voir le paléolith d'el Riet, au nord, qui forme un important méandre avec deux diffuences qui débouchent à travers el Goleró, l'une dans la baie de Fangar et l'autre en mer ouverte, en direction nord-est. La carte de Rafael Pardo Figueroa (1887-1890) (fig. 4b) montre un delta plus développé et une forte accretion des crochets, qui s'assimilent beaucoup à leur forme actuelle. Il s'agit d'un delta progradant avec un lobe en pointe à l'embouchure, que l'on peut encore observer dans la photographie aérienne de 1956 (fig. 4c). Les dimensions du delta se maintiennent jusqu'à nos jours et la forme des crochets est très semblable à l'actuelle. Entre 1918 et 1927 une grande inondation ouvre plusieurs crevasses en direction nord, ce qui facilite l'abandon et le colmatage de la Gola del Nord et l'apparition de la Gola Tramuntana, ouverte vers le nord. À partir de 1970 commence une phase érosive qui se poursuit encore (fig. 4d). L'embouchure a perdu sa forme en pointe, et a adopté une forme plus arrondie, similaire à celle décrite par Coello (1858) et se consolide à l'embouchure septentrionale. Les flèches en crochet augmentent leur superficie et croissent vers l'ouest, où ils ferment partiellement les baies de Fangar et d'Alfacs dans la partie nord et sud du delta respectivement (fig. 4e).

L'analyse des changements du trait de côte entre 1890 et 2012 nous donne une vision à long terme de l'évolution du delta, de ses différentes tendances en fonction des secteurs (fig. 4f). La régression la plus importante se produit dans l'ancienne embouchure, avec des valeurs qui oscillent entre - 2 600 et - 2 100 m (fig. 4f, secteur 6). Dans les flèches une érosion se produit sur la face extérieure, avec des valeurs qui varient entre - 600 et - 700 m dans le Fangar (secteurs 3 et 4) et entre - 500 et - 600 m dans le Trabucador (secteur 7). À cette

période la flèche septentrionale s'érode davantage que la méridionale et les deux pivotent vers la côte, avec des processus d'érosion qui se compensent dans la face interne, associés normalement à des phénomènes de tempêtes. L'accrétion du delta est localisée sur les flèches en crochet, avec des valeurs entre 700 et 2 000 m dans la Banya (secteur 9B), et entre 400 et 800 m sur la face interne du Fangar (secteur 2).

On peut aussi observer que la face externe de la flèche en crochet de la Banya a un double comportement : d'érosion sur son extrémité orientale (secteur 9A) et d'accrétion dans sa partie occidentale (9B). Dans le cas du Fangar (secteur 3), il est légèrement érosif et l'accumulation se concentre sur la face interne. L'érosion du delta ne se produit pas de façon uniforme, car la plaine deltaïque souffre une diminution importante de sa superficie, mais les sédiments érodés se déposent dans les crochets qui croissent de façon continue (fig. 4e). Ainsi donc, la superficie totale du delta n'a souffert d'aucun changement notable depuis les années 1970, en revanche il s'est produit une redistribution des sédiments qui arrivent au delta. D'autre part, pour la même période, on observe une forte érosion du delta submergé, qui tend à démanteler les lobes déposés les siècles antérieurs (Martínez-Clavel *et al.*, 2016).

Durant les xv^e et xvi^e siècles, la déforestation du bassin-versant, dont les arbres étaient utilisés pour la construction de bateaux pour les traversées transocéaniques, a provoqué la majeure accrétion du delta (Somoza, Rodríguez-Santalla, 2014). Entre les xvii^e et xviii^e siècles, des changements significatifs ont eu lieu aux embouchures (Maldonado, Ribá, 1971 ;

Maldonado, 1972). Au xix^e siècle, l'apport de sédiments a été estimé à 25x106 tm/an (Guillén, Palanques, 1997), tendance qui aurait changé au long du xx^e siècle puisque la construction de réservoirs, qui entravent la circulation de l'eau et retiennent les sédiments, a diminué le débit d'eau circulant (Dolz *et al.*, 1997 ; Guillén, Palanques, 1997 ; Sánchez-Chóliz, Sarasa, 2015). La réduction

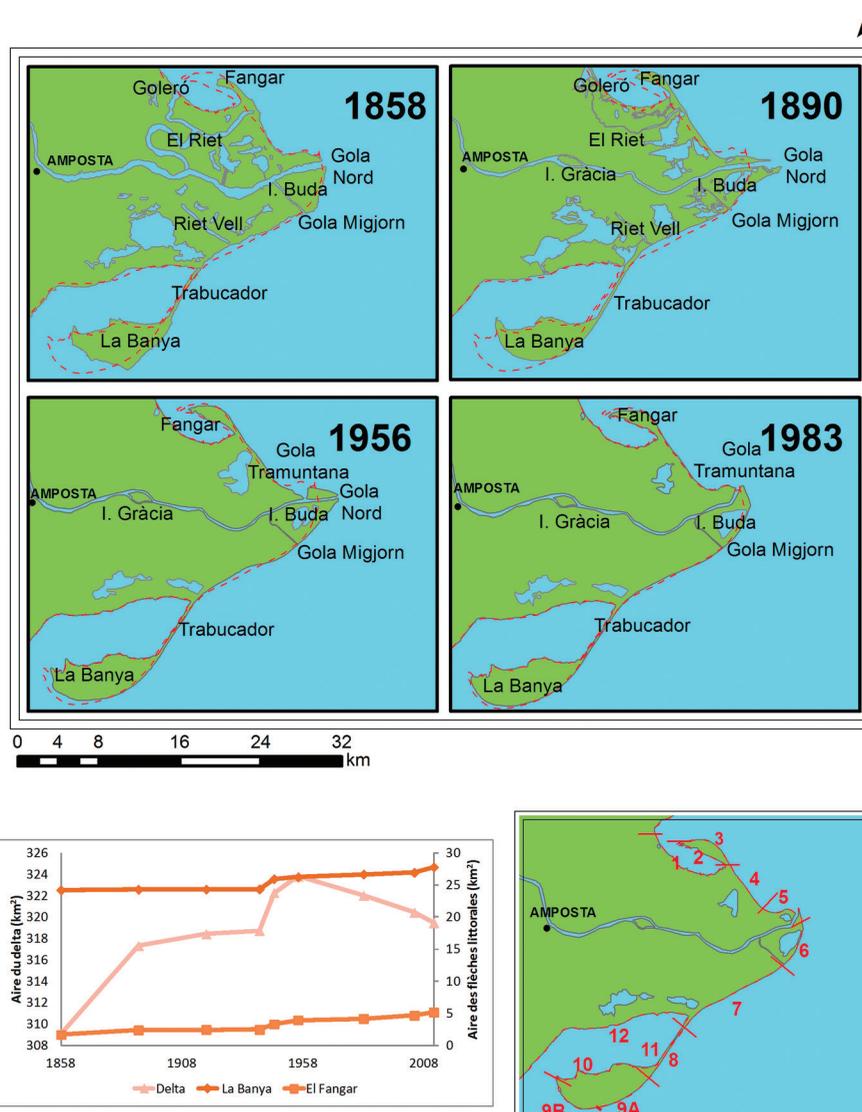


Fig. 4 – Évolution du delta entre 1858 (a), 1890 (b), 1956 (c) et 1983 (d) [en lignes discontinues apparaît la silhouette du delta en 2012]. Tout au long de cette période la superficie du delta (y compris la plaine deltaïque émergée, les flèches et les zones humides) a souffert de profonds changements (e), avec une forte croissance jusqu'en 1956 et une diminution à partir de ce moment. Cependant, l'érosion du lobe frontal du delta est compensée par une augmentation de la superficie des flèches et des ganchos. D'autre part, l'analyse des changements de la ligne de côte du delta (f) montre des secteurs différenciés avec un comportement érosif ou d'accrétion (voir explication dans le texte)

Source : Valls *et al.*, 2016.

d'apports solides et liquides a provoqué des changements essentiels dès les années 1970. La construction de plus de 200 barrages-réservoirs dans le bassin-versant et surtout la construction de ceux de Mequinenza (1964) et de Riba-roja (1969) ont réduit de 99 % la charge sédimentaire, qui maintenant se trouve retenue dans ces barrages-réservoirs (Guillén, Palanques, 1992 ; Ibañez *et al.*, 1996). La différence évolutive est évidente si l'on compare la situation avant et après 1969, date de la dernière construction de barrage-réservoir et où l'on observe une diminution de la superficie de la plaine deltaïque. On peut observer comment certains secteurs qui étaient progradants en régime naturel sont devenus érosifs dans la seconde phase, et le retrait particulièrement important de l'embouchure actuelle.

Actuellement le delta pâtit des changements environnementaux enregistrés tout au long du xx^e siècle :

- i) diminution des débits et des alluvions ;
- ii) balance de sédimentation négative pour l'ensemble du delta ;
- iii) subsidence ;
- iv) montée du niveau de la mer ;
- v) détérioration de la qualité de l'eau du fleuve, de l'estuaire, des lagunes et des baies ;
- vi) intrusion du biseau salé dans le cours d'eau ;
- vii) perte de zones humides, d'autres habitats naturels et d'espèces qui y habitent (PIPDE, 2006).

La diminution du débit est associée à l'intrusion du biseau salé, à la détérioration de la qualité de l'eau du fleuve et aux pertes de zones humides et de biodiversité. Pour combattre ce problème, des débits écologiques ont été établis, quoiqu'ils aient suscités une certaine polémique entre les différentes administrations qui gèrent l'eau. La confédération hydrographique de l'Èbre (administration centrale) propose dans le plan hydrologique national 2015-2021, des débits écologiques moindres que la commission de Durabilité des terres de l'Èbre (*Comisión de Sostenibilidad de las Tierras del Ebro, 2015*) [administration régionale]. Cependant il y a consensus sur le fait qu'au-dessous d'environ 100-130 m³/s le biseau salé progresse jusqu'à atteindre son maximum, au-delà de l'Amposta, et au-dessus de 400 m³/s, il disparaît. Récemment un accord a été conclu entre toutes les parties pour établir un débit écologique annuel qui oscille entre 5 871 hm³ (année sèche), 7 732 hm³ (année moyenne) et 9 907 hm³ (année humide). Ces chiffres proposés par la commission de Durabilité des terres de l'Èbre (CSTE), sont bien supérieurs à ceux que proposait le plan hydrologique (CSTE, 2015). D'un autre côté, il

semble que tous soient d'accord sur la nécessité de crues de 1 500-1 800 m³/s pour détruire les macrophytes et créer un débit régénérateur du lit.

Le manque de sédiments provoque une diminution de la plaine deltaïque et met en exergue les effets de la subsidence et de la montée du niveau de la mer. Ce dernier siècle, le taux moyen de transgression eustatique dans le delta est estimé entre 1 et 2 mm/an et le volume annuel de sédiments nécessaires pour combattre cette transgression est estimé à 2 millions de m³/an. Si en plus on admet un taux de subsidence de 5 mm/an sur une superficie de 250 km², il faudrait 1 300 000 tm/an de sédiments, alors qu'actuellement on ne dispose que de 0,15 million de tm/an (PIPDE, 2006).

V – Impact anthropique direct sur les lits fluviaux

S'il est vrai que le changement global a provoqué de nombreux problèmes hydrogéomorphologiques généralisés, il n'en est pas moins vrai que les nombreux impacts locaux dérivés d'activités anthropiques ont, eux aussi, eu des conséquences sur les cours d'eau. Il s'agit là d'impacts très nombreux, dans tous les cours fluviaux du bassin-versant dus à l'utilisation intensive des espaces et des ressources fluviales (Ollero, 2008).

Cette problématique environnementale n'a cependant pas suscité un grand intérêt scientifique, et d'ailleurs on ne peut trouver que quelques références de cas concrets (*e. g.* García Ruiz, Puigdefàbregas, 1985 ; Serrano-Notivoli *et al.*, 2017). Malgré cela, il nous faut souligner l'intérêt croissant des administrations publiques (ministère de l'Environnement, confédérations hydrographiques, communautés autonomes, mairies) et de certains collectifs de défense de l'environnement (Sánchez Fabre, Ollero, 2010). C'est ainsi que dans la dernière décennie de nombreux forums, congrès, mais aussi de nombreuses réunions techniques et d'études ont eu lieu. Certains spécialistes en géomorphologie fluviale ont participé à ce processus technique de dialogue, de formation, de participation et de recherche de solutions. C'est dans ce cadre-là que l'on a dénoncé les problèmes fluviaux dérivés des interventions directes sur les lits.

Mis à part les barrages-réservoirs, à l'origine de grandes altérations, associés aux effets du changement global, dans de nombreux cours d'eau de plaines et de

montagne on enregistre des dérivations du débit pour l'approvisionnement de mini-centrales hydroélectriques (Ibáñez *et al.*, 2013) ou plus fréquemment pour irriguer les terres. Dans certains cas, les réductions de débit sont très fortes, de telle sorte que les lits fluviaux sont envahis par la végétation et on assiste à des processus locaux de rétrécissement et d'incision du lit. Ces processus de simplification géomorphologique, ajoutés à ceux dus au changement global se généralisent et s'étendent en aval en particulier dans les cours d'eau contrôlés. Les exemples les plus représentatifs sont certains tronçons des rivières pyrénéennes telles que le Gállego, l'Ésera et la Noguera Ribagorzana. Ces trente dernières années, la colonisation végétale de tous les lits du bassin-versant a été substantielle, que ce soit à cause du changement global ou des impacts locaux.

La construction systématique de digues pour éviter les inondations, de cordons d'enrochement et d'autres systèmes défensifs pour éviter l'érosion des berges commence dans les années 1960 dans les cours d'eau sinueux et méandriques du bassin-versant. Dans le cas de l'Èbre, on doit leurs constructions surtout aux inondations de 1959, 1960 et 1966 (Ollero, 2010). Le processus

s'est terminé au début des années 1980 dans l'Èbre et l'Aragon et dans les années 1990 dans le Cinca, cours fluvial touché en novembre de 1982 par une inondation. Parallèlement, une occupation massive des terres à des fins agricoles se développe dans les plaines d'inondation, de telle sorte qu'en 2012 seulement 14,3 % de celles-ci demeurent à l'état naturel dans le cours moyen de l'Èbre, 9,3 % dans le cours inférieur de l'Aragon, 18,8 % dans le cours inférieur du Gállego et 19,3 % dans le cours inférieur du Cinca (Ollero *et al.*, 2015). De nos jours, 100 % des berges actives du cours moyen de l'Èbre sont protégées. La canalisation complète des 13 derniers km de l'Arga (terminée dans les années 1980) est un cas extrême d'endiguement. Elle a provoqué une coupure des méandres qu'il décrivait et a créé un lit artificiel et peu sinueux (Acín *et al.*, 2011).

Les extractions de granulats ont été abondantes et fréquentes dans de nombreux cours d'eau du bassin-versant. On les a employés dans la construction mais aussi pour augmenter la capacité d'évacuation des crues. Les tronçons graveleux des cours pyrénéens, dans lesquels on trouve encore certaines entreprises d'extraction minière, ont été particulièrement touchés par ces activités

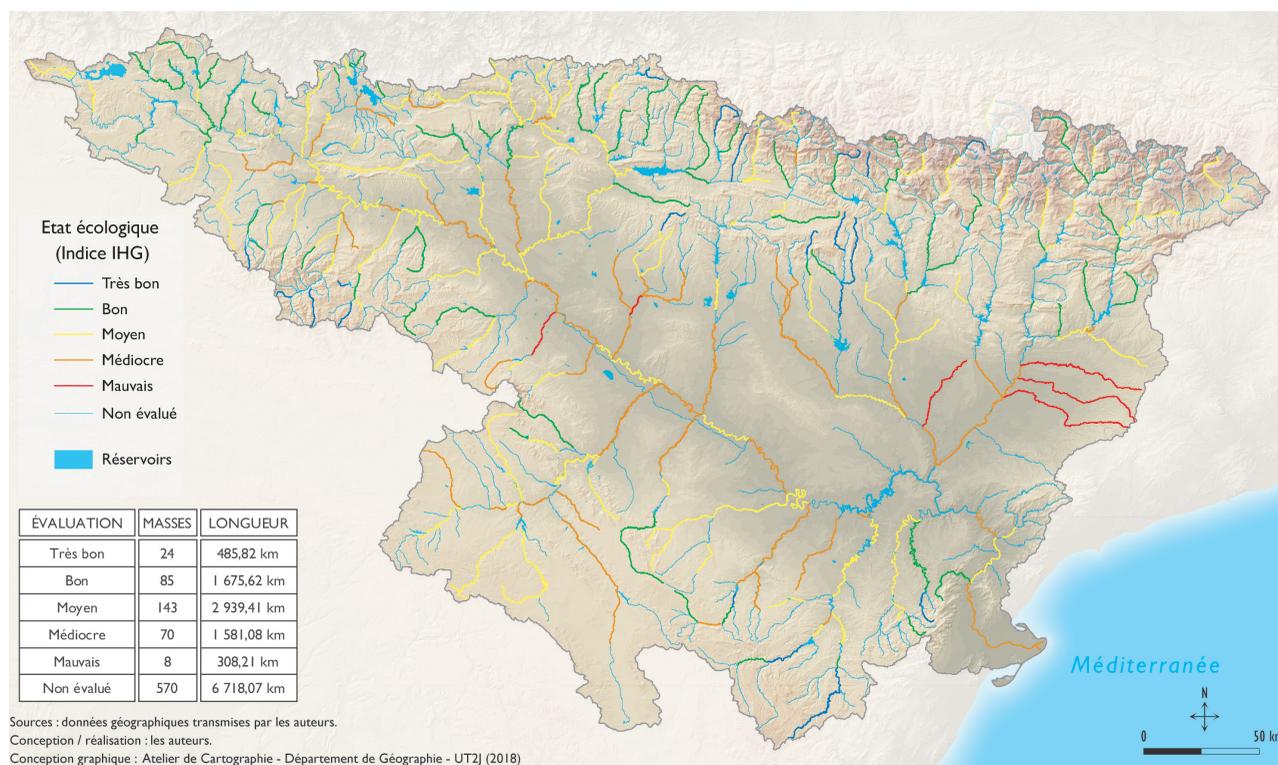


Fig. 5 – Évaluation hydromorphologique des fleuves du bassin versant de l'Èbre selon l'indice IHG

Source : Durán *et al.*, 2010

extractives. Nous ne disposons d'aucune information ni d'aucune évaluation des volumes extraits, et les conséquences de ces activités n'ont pas été évaluées non plus. La seule étude dont nous disposons, est celle faite du cours bas du Gállego, qui met en évidence l'intensité des extractions dans les années 1960 et 1970 (Martín Vide *et al.*, 2010), en raison de l'accroissement de la ville de Saragosse.

Par le fait des impacts signalés, l'état hydromorphologique des cours du bassin-versant de l'Èbre présente des déficiences importantes, comme on peut le constater dans différents rapports techniques (Mora *et al.*, 2012). La perte de styles géomorphologiques dans les lits fluviaux due aux altérations anthropiques ou suite aux effets du changement global constitue une détérioration de l'état écologique des masses d'eau affectées, conformément à la directive européenne de l'Eau (2000/60/CE). Cela suppose aussi une perte de patrimoine géomorphologique et de géodiversité fondamentale. Les cours les plus détériorés sont ceux des plaines, ainsi que ceux des montagnes du fait des activités hydroélectriques et de la régulation (fig. 5). Les cours en meilleur état seraient les cours supérieurs des fleuves ibériques et les pyrénéens situés dans des espaces protégés.

Conclusion

La géomorphologie fluviale, appliquée à l'analyse des changements récents dans les lits fluviaux du bassin-versant de l'Èbre et dans son delta, s'est révélée utile pour le diagnostic des changements environnementaux, pour l'explication de ses causes et de ses conséquences.

Les processus de stabilisation et de simplification fluviale sont généralisés dans tout le bassin. Ils sont le résultat du changement global et des pressions humaines et impliquent une importante perte de géodiversité et de fonctionnement naturel. Il s'agit là de problèmes de premier plan et dont la solution est complexe. La restauration fluviale constitue le principal défi pour l'avenir. Elle ouvre une voie à la récupération de la naturalité pour mitiger les effets des changements survenus.

Bibliographie

- ACÍN V., *Cambios en la dinámica fluvial de los ríos Gállego (tramo Biescas-Sabiñánigo) y Aurín en los últimos 50 años*, Trabajo fin de licenciatura de Geografía, Universidad de Zaragoza, 2004.
- ACÍN V., DÍAZ E., GRANADO D., IBISATE A., OLLERO A., « Cambios recientes en el cauce y la llanura de inundación del área de confluencia Aragón-Arga (Navarra) », *Geographicalia*, n^{os} 59-60, 2011, p. 11-25.
- BATALLA R. J., « Sediment Deficit in Rivers Caused by Dams and Instream Gravel Mining. A Review with Examples from NE Spain », *Cuaternario y Geomorfología*, n^o 17, 2003, p. 79-91.
- BATALLA R. J., GÓMEZ C. M., KONDOLF G. M., « Reservoir-Induced Hydrological Changes in the Ebro River Basin (NE Spain) », *Journal of Hydrology*, n^o 290, 2004, p. 117-136.
- BATALLA R. J., VERICAT D., « An Appraisal of the Contemporary Sediment Yield in the Ebro Basin », *Journal of Soils and Sediments*, n^o 11, 2011, p. 1070-1081.
- BATALLA R. J., VERICAT D., TENA A., « The Fluvial Geomorphology of the Lower Ebro (2002-2013): Bridging Gaps Between Management and Research », *Cuadernos de Investigación Geográfica*, n^o 40, 2014, p. 29-52.
- BEGUERÍA S., LÓPEZ-MORENO J. I., LORENTE A., SEEGER M., GARCÍA-RUIZ J. M., « Assessing the Effect of Climate Oscillations and Land-Use Changes on Streamflow in the Central Spanish Pyrenees », *Ambio*, n^o 32, 2003, p. 283-286.
- BEGUERÍA S., LÓPEZ-MORENO J. I., GÓMEZ VILLAR A., RUBIO V., LANA-RENAULT N., GARCÍA RUIZ J. M., « Fluvial Adjustments to Soil Erosion and Plant Cover Changes in the Central Spanish Pyrenees »,

- Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, n° 88, 2006, p. 177-186.
- BESNÉ P., IBISATE A., « River Channel Adjustment of Several River Reaches on Ebro Basin », *Quaternary International*, n° 364, 2015, p. 44-53.
- BLÖSCHL G., ARDOIN-BARDIN S., BONNELL M., DORNINGER M., GOODRICH D., GUTKNECHT D., MATAMOROS D., MERZ B., SHAND P., SZOLGAY J., « At What Scales Do Climate Variability and Land Cover Change Impact on Flooding and Low Flows? », *Hydrological Processes*, n° 21, 2007, p. 1241-1247.
- BUFFINGTON J. M., « Changes in Channel Morphology over Human Time Scales », dans CHURCH M., BIRON P. M., ROY A. G. (dir.), *Gravel-Bed Rivers: Processes, Tools, Environments*, Wiley, 2012.
- CABEZAS A., COMÍN F. A., BEGUERÍA S., TRABUCCHI M., « Hydrologic and Landscape Changes in the Middle Ebro River (NE Spain): Implications for Restoration and Management », *Hydrology and Earth System Sciences*, n° 13, 2009, p. 1-12.
- CANICIO A., IBÁÑEZ C., « The Holocene Evolution of the Ebro Delta, Catalonia, Spain », *Acta Geographica Sinica*, n° 54, 1999, p. 462-469.
- COMISSIÓ TÈCNICA DE SOSTENIBILITAT DE LES TERRES DE L'ÈBRE (CSTE), *Revisión y actualización de la propuesta de régimen de caudales ecológicos en el tramo final del río Ebro, delta y estuario*, 2015.
- CONESA C., « Cambio ambiental y equilibrio dinámico de los cauces », *Papeles de Geografía*, n° 30, 1999, p. 31-46.
- DAY J. W., MALTBY E., IBÁÑEZ C., « River Basin Management and Delta Sustainability: A Commentary on the Ebro Delta and the Spanish National Hydrological Plan », *Ecological Engineering*, n° 26, 2006, p. 85-99.
- DEL RÍO S., HERRERO L., FRAILE R., PENAS A., « Spatial Distribution of Recent Rainfall Trends in Spain (1961-2006) », *International Journal of Climatology*, n° 31, 2011, p. 656-667.
- DOLZ J., GÓMEZ M., NIETO J., « El Ebro en el delta », *Revista de Obras Públicas*, n° 3368, 1997, p. 7-14.
- DURÁN C., NAVARRO P., PARDOS M., BALLARÍN D., MORA D., MONTORIO R., OLLERO A. *Aplicación del Índice Hidrogeomorfológico IHG a la cuenca del Ebro*, Confederación Hidrográfica del Ebro, 2010.
- FRUTOS L. M., OLLERO A., SÁNCHEZ FABRE M., « Caracterización del río Ebro y su cuenca y variaciones en su comportamiento hidrológico », dans GIL OLCINA A. (dir.), *Alteración de los regímenes fluviales peninsulares*, Fundación Caja Murcia, 2004.
- GARCÍA RUIZ J. M., PUIGDEFÁBREGAS J., « Efectos de la construcción de pequeñas presas en cauces anastomosados del Pirineo Central », *Cuadernos de Investigación Geográfica*, n° 10, 1985, p. 91-102.
- GARCÍA RUIZ J. M., LÓPEZ MORENO J. I., VICENTE S. M., LASANTA T., BEGUERÍA S., « Mediterranean Water Resources in a Global Change Scenario », *Earth Science Reviews*, n° 105, 2011, p. 121-139.
- GARCÍA RUIZ J. M., LANA-RENAULT N., BEGUERÍA S., LASANTA T., REGÜÉS D., NADAL E., SERRANO P., LÓPEZ MORENO J. I., ALVERA B., MARTÍ BONO C., ALATORRE L. C., « From Plot to Regional Scales: Interactions of Slope and Catchment Hydrological and Geomorphic Processes in the Spanish Pyrenees », *Geomorphology*, n° 120, 2010, p. 248-257.
- GARCÍA RUIZ J. M., LÓPEZ MORENO J. I., LASANTA T., VICENTE S. M., GONZÁLEZ SAMPÉRIZ P., VALERO B. L., SANJUÁN Y., BEGUERÍA S., NADAL E., LANA-RENAULT N., GÓMEZ VILLAR A., « Los efectos geocológicos del cambio global en el Pirineo central español: una revisión a distintas escalas espaciales y temporales », *Pirineos*, n° 170, 2015.
- GÓMEZ C. M., DELACÁMARA G., PÉREZ-BLANCO C. D., RODRÍGUEZ M., « Voluntary Agreement for River Regime Restoration Services in the Ebro River Basin (Spain) », *Journal of Hydrology*, n° 518, 2014, p. 365-378.
- GÓMEZ VILLAR A., MARTÍNEZ CASTROVIEJO R., « Channel Degradation as a Response to Erosion Control Works: A Case Study », dans Sala M., Rubio J. L., García Ruiz J. M. (dir.), *Soil Erosion Studies in Spain*, Geofoma, 1991.
- GÓMEZ VILLAR A., GARCÍA RUIZ J. M., « Surface Sediment Characteristics and Present Dynamics in Alluvial Fans of the Central Spanish Pyrenees », *Geomorphology*, n° 34, 2000, p. 127-144.
- GÓMEZ VILLAR A., SANJUÁN Y., GARCÍA RUIZ J. M., NADAL E., ÁLVAREZ J., ARNÁEZ J., SERRANO M. P., « Sediment Organization and Adjustment in a Torrential Reach of the Upper Ijuez River, Central Spanish Pyrenees », *Cuadernos de Investigación Geográfica*, n° 40, 2014, p. 191-214.
- GONZALO L. E., OLLERO A., IBISATE A., BALLARÍN D., « Impacto geomorfológico de actuaciones en cauces fluviales de La Rioja », *Zubía*, n° 28, 2010, p. 7-30.
- GRANADO D., *Dinámica fluvial y vegetación de ribera del río Aragón en el tramo Jaca-Puente la Reina*, Trabajo fin de licenciatura de Geografía, Universidad de Zaragoza, 2004.
- GUILLÉN J., DÍAZ J. I., « Elementos morfológicos en la zona litoral: ejemplos en el delta del Ebro », *Scientia Marina*, n° 54, 1990, p. 359-373.

- GUILLÉN J., PALANQUES A., « Sediment Dynamics and Hydrodynamics in the Lower Course of a River Highly Regulated by Dams: The Ebro River », *Sedimentology*, n° 39, 1992, p. 567-579.
- GUILLÉN J., PALANQUES A., « A Historical Perspective of the Morphological Revolution in the Lower Ebro River », *Environmental Geology*, n° 30, 1997, p. 174-180.
- HOFFMANN T., THORNDYCRRAFT V. R., BROWN A. G., COULTHARD T. J., DAMNATI B., KALE V. S., MIDDELKOOP H., NOTEBAERT B. WALLING D. S., « Human Impact on Fluvial Regimes and Sediment Flux During the Holocene: Review and Future Research Agenda », *Global and Planetary Change*, n° 72, 2010, p. 87-98.
- HORACIO J., *Medicina fluvial. Un nuevo paradigma en la conservación y restauración de ríos bajo el enfoque de la geomorfología*, Jolube, 2015.
- IBAÑEZ C., PRAT N., CANICIO A., « Changes in the Hydrology and Sediment Transport Produced by Large Dams on the Lower Ebro River and Its Estuary », *Regulated Rivers: Research and Management*, n° 12, 1996, p. 51-62.
- IBAÑEZ C., CANICIO A., DAY J. W., CURCÓ A., « Morphologic Development, Relative Sea Level Rise and Sustainable Management of Water and Sediment in the Ebre Delta, Spain », *Journal of Coastal Conservation*, n° 3, 1997, p. 191-202.
- IBISATE A., « Variación del riesgo de inundaciones en el río Zadorra (País Vasco) como consecuencia de su regulación », *Investigaciones Geográficas*, n° 36, 2005, p. 119-133.
- IBISATE A., OLLERO A., DÍAZ E., « Influence of Catchment Processes on Fluvial Morphology and River Habitats », *Limnetica*, n° 30, 2011, p. 169-182.
- IBISATE A., DÍAZ E., OLLERO A., ACÍN V., GRANADO D., « Channel Response to Multiple Damming in a Meandering River, Middle and Lower Aragón River (Spain) », *Hydrobiologia*, n° 712, 2013, p. 5-23.
- LESPINAS F., LUDWIG W., HEUSSNER S., « Impact of Recent Climate Change on the Hydrology of Coastal Mediterranean Rivers in Southern France », *Climatic Change*, n° 99, 2010, p. 425-456.
- LIQUETE C., CANALS M., LUDWIG W., ARNAU P., « Sediment Discharge of the Rivers of Catalonia, NE Spain, and the Influence of Human Impacts », *Journal of Hydrology*, n° 366, 2009, p. 76-88.
- LLENA M., VERICAT D., MARTÍNEZ CASASNOVAS J. A., « Cambios geomorfológicos en el Alto Cinca, período 1927-2014 », *Actas de la XIV Reunión Nacional de Geomorfología*, 2016.
- LOBERA G., BESNÉ P., VERICAT D., LÓPEZ-TARAZÓN J. A., TENA A., ARISTI I., DÍEZ J. R., IBISATE A., LARRAÑAGA A., ELOSEGI A., BATALLA R. J., « Geomorphic Status of Regulated Rivers in the Iberian Peninsula », *Science of the Total Environment*, n° 508, 2015, p. 101-114.
- LÓPEZ MORENO J. I., BEGUERÍA S., GARCÍA RUIZ J. M., « Trends in High Flows in the Central Spanish Pyrenees: Response to Climatic Factor or to Land-Use Change? », *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, n° 51, 2006, p. 1039-1050.
- LÓPEZ MORENO J. I., BENISTON M., GARCÍA RUIZ J. M., « Environmental Change and Water Management in the Pyrenees: Facts and Future Perspectives for Mediterranean Mountains », *Global and Planetary Change*, n° 61, 2008, p. 300-312.
- LÓPEZ MORENO J. I., VICENTE S. M., MORÁN E., ZABALZA J., LORENZO J., GARCÍA RUIZ J. M., « Impact of Climate Evolution and Land Use Changes on Water Yield in the Ebro Basin », *Hydrology and Earth System Sciences*, n° 15, 2011, p. 311-322.
- LORENZO J., VICENTE S. M., LÓPEZ MORENO J. I., MORÁN E., ZABALZA J., « Recent Trends in Iberian Streamflows (1945-2005) », *Journal of Hydrology*, n° 414-415, 2012, p. 463-475.
- MAGDALENO F., FERNÁNDEZ J. A., « Hydromorphological Alteration of a Large Mediterranean River: Relative Role of High and Low Flows on the Evolution of Riparian Forests and Channel Morphology », *River Research and Applications*, n° 27, 2011, p. 374-387.
- MAGDALENO F., FERNÁNDEZ J. A., MERINO S., « The Ebro River in the 20th Century or the Ecomorphological Transformation of a Large and Dynamic Mediterranean Cannel », *Earth Surface Processes and Landforms*, n° 37, 2012, p. 486-498.
- MALDONADO A., « El Delta del Ebro. Estudio sedimentológico y estratigráfico », *Boletín de Estratigrafía*, n° 1, 1972, p. 1-486.
- MALDONADO A., RIBA O., « El delta reciente del río Ebro : descripción y evolución », *Acta Geológica Hispánica*, n° 5, 1971, p. 131-138.
- MARTÍN VIDE J. P., FERRER-BOIX C., OLLERO A., « Incision Due to Gravel Mining: Modeling a Case Study from the Gállego River, Spain », *Geomorphology*, n° 117, 2010, p. 261-271.
- MARTÍNEZ-CLAVEL B., SEGURA-BELTRAN F., PARDO-PASCUAL J., GUILLÉN J., « Análisis de los cambios morfológicos en el delta sumergido del Ebro (1880-1992) », *Actas de la XIV Reunión Nacional de Geomorfología*, 2016.
- MORA D., BALLARÍN D., MONTORIO R., ZÚÑIGA M., OLLERO A., DURÁN C., NAVARRO P., « Aplicación del índice hidrogeomorfológico IHG en el territorio aragonés

- de la cuenca del Ebro », *Naturaleza Aragonesa*, n° 28, 2012, p. 35-42.
- OLLERO A., *Los meandros libres del Ebro medio (Logroño-La Zaida) : geomorfología fluvial, ecogeografía y riesgos*, Tesis doctoral. Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, 1992.
- OLLERO A., « Alteraciones geomorfológicas de los ríos en Europa y principios para la restauración de su dinámica », dans GONZÁLEZ DEL TÁNAGO M. (dir.), *Ríos y sostenibilidad. Semana temática « Agua para la vida »*, Tribuna del Agua de la Exposición Internacional Zaragoza, 2008.
- OLLERO A., « Channel Changes and Floodplain Management in the Meandering Middle Ebro River, Spain », *Geomorphology*, n° 117, 2010, p. 247-260.
- OLLERO A., « Los cauces fluviales como indicadores de cambio global : propuesta metodológica », *Zubía*, n° 23, 2011, p. 189-202.
- OLLERO A., IBISATE A., GRANADO D., REAL DE ASUA R., « Channel Responses to Global Change and Local Impacts: Perspectives and Tools for Floodplain Management (Ebro River and Tributaries, NE Spain) », dans HUDSON P. F., MIDDELKOOP H. (dir.), *Geomorphic Approaches to Integrated Floodplain Management of Lowland Fluvial Systems in North America and Europe*, Springer, 2015.
- OLLERO A., ACÍN V., GRANADO D., HORACIO J., IBISATE A., « Censo, tipología y puesta en valor de los cauces de gravas del Pirineo central y su piedemonte meridional », *Revista Geográfica del Sur*, n° 7, 2016, p. 10-25.
- PIÉGAY H., ALBER A., SLATER L., BOURDIN L., « Census and Typology of Braided Rivers in the French Alps », *Aquatic Sciences*, n° 71, 2009, p. 371-388.
- PLAN INTEGRAL DE PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO (PIPDE), <http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/documentobase-final3 tcm7-29340.pdf>, 2006.
- SÁNCHEZ-CHÓLIZ J., SARASA C., « River Flows in the Ebro Basin: A Century of Evolution, 1913-2013 », *Water*, n° 7, 2015, p. 3072-3082.
- SÁNCHEZ FABRE M., OLLERO A., « Agua y medio ambiente en España: diagnóstico y perspectivas de algunas líneas de acción », *Investigaciones Geográficas*, n° 51, 2010, p. 53-79.
- SANCHIS-IBOR C., SEGURA-BELTRAN F., « Spatial Variability of Channel Changes in a Mediterranean Ephemeral Stream in the Last Six Decades (1946-2006) », *Cuadernos de Investigación Geográfica*, n° 40, 2014, p. 89-118.
- SEGURA-BELTRAN F., SANCHIS-IBOR C., « Assessment of Channel Changes in a Mediterranean Ephemeral Stream Since the Early Twentieth Century. The Rambla de Cervera, Eastern Spain », *Geomorphology*, n° 201, 2013, p. 199-214.
- SERRANO-NOTIVOLI R., MORA D., OLLERO A., SÁNCHEZ FABRE M., SANZ P., SAZ M. A., « Floodplain Occupation and Flooding in the Central Pyrenees », *Cuadernos de Investigación Geográfica*, n° 43, 2017.
- SCORPIO V., ROSSKOPF C. M., « Channel Adjustments in a Mediterranean River over the Last 150 years in the Context of Anthropogenic and Natural Controls », *Geomorphology*, n° 275, 2016, p. 90-104.
- SOMOZA L., RODRÍGUEZ-SANTALLA I., « Geology and Geomorphological Evolution of the Ebro River Delta », dans *Landscapes and Landforms of Spain*, Springer, 2014.
- VALLS A., SEGURA-BELTRAN F., MARTÍNEZ-CLAVEL B., « El delta del Ebro a través de la cartografía histórica y la fotografía aérea: evolución morfológica de la llanura deltaica (1858-2012) », *Actas de la XIV Reunión Nacional de Geomorfología*, 2016.
- ZARFL C., LUMSDON A. E., BERLEKAMP J., TYDECKS L., TOCKNER K., « A Global Boom in Hydropower Dam Construction », *Aquatic Sciences*, n° 77, 2015, p. 161-170.
- ZAWIEJSKA J., WYZGA B., « Twentieth-Century Channel Change on the Dunajec River, Southern Poland: Patterns, Causes and Controls », *Geomorphology*, n° 117, 2010, p. 234-246.